

**П. В. БОРОВИК****МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ ТЕКУЧЕСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ  
ПРИ ТРЕХМЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ РЕЗКИ НА НОЖНИЦАХ**

На основании известных экспериментальных зависимостей и их аппроксимаций разработан простой и эффективный метод построения кривых текучести и пластичности. Предложено при построении кривых текучести и пластичности материала использовать результаты испытаний на растяжение. Так кривые текучести предложено строить на основании значений предела текучести и предела прочности материала, относительного удлинения при разрыве, а также с учетом скорости деформации. Кривые пластичности материала предложено получать с учетом величины относительного удлинения при разрыве. Приведено описание и характерные особенности трехмерных математических моделей процесса резки параллельными ножами, разработанных на базе метода конечных элементов в программном комплексе Abaqus. Описаны конструкции и основные параметры трех экспериментальных лабораторных установок, на которых были получены практические зависимости силы резки параллельными ножами с указанием конкретных механических свойств материала и размеров сечения разрезаемых образцов. Представлены в сравнении графические зависимости силы резки по результатам математического моделирования и экспериментальным данным. Отмечено, что предложенный метод построения кривых текучести и пластичности при трехмерном моделировании процессов холодной резки на ножницах позволяет получать удовлетворительные результаты энергосиловых и кинематических параметров процесса. Коэффициент корреляции между смоделированными и экспериментальными зависимостями превысил 0,8. В экстремуме отклонения максимальных значений силы резки по результатам моделирования от экспериментальных значений не превысили  $\pm 15\%$ , а величина относительного внедрения до скола находилась в пределах  $\pm 5\%$ . Сделан вывод, что предложенный метод будет способствовать развитию математического моделирования процессов резки на ножницах и углублению представлений о процессах, протекающих в металле. Результаты работы могут быть полезны при исследовании процессов холодной резки на ножницах в прокатном производстве, а также при разработке практических рекомендаций по их эксплуатации и при принятии конструкторских и технологических решений.

**Ключевые слова:** кривая текучести, кривая пластичности, резка на ножницах, сила резки, метод конечных элементов, моделирование.

**П. В. БОРОВИК****МЕТОД ПОБУДОВИ КРИВИХ ТЕКУЧОСТІ ТА ПЛАСТИЧНОСТІ  
ПРИ ТРИВИМІРНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСІВ ХОЛОДНОГО РІЗАННЯ НА НОЖИЦЯХ**

На підставі відомих експериментальних залежностей і їх апроксимацій розроблений простий і ефективний метод побудови кривих текучості і пластичності. Запропоновано при побудові кривих текучості і пластичності матеріалу використовувати результати випробувань на розтяг. Так криві текучості запропоновано будувати на підставі значень границі текучості і границі міцності матеріалу, відносного подовження при розриві, а також з урахуванням швидкості деформації. Криві пластичності матеріалу запропоновано отримувати з урахуванням величини відносного подовження при розриві. Наведено опис і характерні особливості тривимірних математичних моделей процесу різання паралельними ножами, розроблених на базі методу скінченних елементів в програмному комплексі Abaqus. Описано конструкції та основні параметри трьох експериментальних лабораторних установок, на яких були отримані практичні залежності сили різання паралельними ножами із зазначенням конкретних механічних властивостей матеріалу і розмірів перетину зразків, що різалися. Представлені в порівнянні графічні залежності сили різання за результатами математичного моделювання та експериментальними даними. Відзначено, що запропонований метод побудови кривих текучості і пластичності при тривимірному моделюванні процесів холодної різання на ножницях дозволяє отримувати задовільні результати енергосилових і кінематичних параметрів процесу. Коефіцієнт кореляції між змодельованими і експериментальними залежностями перевищив 0,8. У екстремумі відхилення максимальних значень сили різання за результатами моделювання від експериментальних значень не перевищили  $\pm 15\%$ , а величина відносного проникнення до відколу перебувала в межах  $\pm 5\%$ . Зроблено висновок, що запропонований метод буде сприяти розвитку математичного моделювання процесів різання на ножницях і поглибленню уявлень про процеси, що протікають в металі. Результати роботи можуть бути корисні при дослідженні процесів холодної різання на ножницях в прокатному виробництві, а також при розробці практичних рекомендацій щодо їх експлуатації та при прийнятті конструкторських і технологічних рішень.

**Ключові слова:** крива текучості, крива пластичності, різання на ножницях, сила різання, метод скінченних елементів, моделювання.

**P. V. BOROVIK****A METHOD FOR DETERMINATION OF THE STRESS-STRAIN CURVES AND DUCTILITY CURVES  
IN 3D MODELING OF COLD SEPARATING PROCESSES ON SHEARS**

On the grounds of well-known experimental dependences and their approximations simple and effective method for constructing stress-strain and damage curves has been developed. It is offered to use the results of tensile tests in the construction of the stress-strain and damage curves of the material. Thus, it has been offered to build the stress-strain curves based on the values of the yield strength and tensile strength of the material, the elongation at fracture, and also taking into consideration the strain rate. The damage curves of the material is offered to receive in a view of the elongation at fracture. There are presented a description and characteristic features of three-dimensional mathematical models of the shearing process with parallel knives, which was developed on the basis of the finite element method in the Abaqus software package. The constructions and main parameters of three experimental laboratory installations are described, on which practical dependences of the shearing force by parallel knives were obtained, indicating the specific mechanical properties of the material and the dimensions of the shearing cross-section. Graphic dependences of the shearing force according to the results of mathematical modeling and experimental data are presented in comparison. It is noted that the offered method for constructing stress-strain and damage curves for three-dimensional modeling of cold shearing processes on shears allows to obtain satisfactory results of energy-power and kinematic parameters of the process. The correlation coefficient between the simulated and experimental dependences exceeded 0.8. The deviations of the maximum values of the shearing force in the extremum, according to the simulation results from the experimental values did not exceed  $\pm 15\%$ , and the relative penetration to the cleavage was within  $\pm 5\%$ . The Conclusion is made that offered method will promote development of mathematical modeling of shearing processes on shears and deepen the understanding of the processes occurring in the metal. The results of the work can be useful at processes research of cold shearing processes on shears in the rolling industry, as well as in the development of practical recommendations for their operation and in making design and technological decisions.

**Keywords:** stress-strain curve, damage curve, separating on shears, shearing force, finite element method, modeling.

**Введение.** Для выполнения операций продольной и поперечной резки проката в условиях современного прокатного производства широко используются ножницы [1, 2], которые являются весьма сложными машинами по кинематике и конструкции. Совершенствование и дальнейшее развитие процессов и машин резки требует решения актуальных задач по расширению технологических возможностей уже эксплуатируемого и вновь проектируемого оборудования, повышению точности производимых конструкторских расчетов и увеличению степени достоверности и научной обоснованности при принятии проектных и технологических решений.

**Анализ состояния вопроса.** На пути решения, указанных задач предпочтение отдается экспериментальным исследованиям процессов обработки давлением. Однако такой подход не всегда способен обеспечить полноту получаемой информации, поскольку это требует целого ряда дополнительных финансовых затрат и организационных действий. При этом рост возможностей вычислительной техники, а также успешное развитие методов теоретических исследований, базирующихся на разработке численных математических моделей открывает перед исследователями новые перспективы. Основу данных моделей составляют законы теории упругости и пластичности, а также механики разрушения. Такой комплексный подход в сочетании с достоверной информацией о механических свойствах конкретного материала, позволяет в максимально полной степени отображать реальные физические процессы, протекающие в металле.

Особое место в решении таких задач занимает метод конечных элементов (МКЭ) [3,4], который в последнее время достаточно часто используется при моделировании процесса резки листов [5–7].

Однако адекватное отображение реального процесса резки в ходе моделирования МКЭ возможно только при наличии достоверных кривых текучести и диаграмм пластичности в исследуемых диапазонах температур, степени и скорости деформации.

Так в работе [8] для двухмерного моделирования процесса холодной резки параллельными были использованы известные аппроксимации построения кривых текучести в зависимости от предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и предела прочности  $\sigma_b$  материала при растяжении [9] с учетом влияния скорости деформации [10], а также известная аппроксимация диаграмм пластичности полученная А. А. Лабутиным, по результатам его исследований совместно с Г. А. Смирновым-Аляевым [11].

Полученные в работе [8] результаты показали, что величины силы резки по результатам моделирования МКЭ, во всех рассмотренных случаях имели завышенный результат в диапазоне порядка 15...43% по отношению к экспериментальным данным. Для учета этого явления (в соответствии с классическими представлениями [1]) был введен коэффициент перехода  $K_\sigma$  от предела прочности при растяжении к пределу прочности при срезе. Однако, расширение

экспериментальных данных показало сомнительность данного суждения и необходимость дальнейших исследований в этом вопросе.

**Цель работы.** Совершенствование методики построения зависимостей механических свойств материала, позволяющей адекватно моделировать процесс разделения металла в холодном состоянии на ножницах с параллельными ножами.

**Методика исследований.** В рамках данной работы предусматривалось рассмотрение использовавшихся ранее [8] методик построения кривых текучести и пластичности на предмет их уточнения с последующим трехмерным конечно-элементным моделированием процесса резки на ножницах с параллельными ножами и сравнением результатов с экспериментальными данными.

В основу был положен тот факт, что на сегодняшний день, практически для любой марки стали в справочной литературе [12,13], можно найти результаты испытаний на растяжение, с указанием предела текучести и предела прочности материала при растяжении, а также относительного удлинения при разрыве  $\delta$ . Эти параметры учитывают способ производства и термическую обработку металла.

Очевидно, что предел прочности материала при растяжении и относительное удлинение при разрыве являются взаимосвязанными параметрами, а именно:

$$\sigma_b = \sigma_{ст}(\bar{\epsilon}_{lim}), \quad (1)$$

где  $\bar{\epsilon}_{lim}$  – степень истинной пластической деформации разрушения при растяжении;

$\sigma_{ст}$  – сопротивление деформации при статических испытаниях [9]:

$$\sigma_{ст} = \sigma_{0,2}(\bar{\epsilon}_p/0,002)^{m_0}, \quad (2)$$

где  $\bar{\epsilon}_p$  – степень истинной пластической деформации;  $m_0$  – показатель упрочнения, который зависит от соотношения предела прочности к пределу текучести [9].

Как известно, истинная (логарифмическая) пластическая деформация разрушения при растяжении определяется выражением:

$$\bar{\epsilon}_{lim} = \ln(1 + \delta). \quad (3)$$

Определив по алгоритму (1)–(3) значения предела прочности материала при растяжении и сравнив с фактическими значениями, для материалов, представленных в работе [8], можно отметить, что во всех случаях имеют место завышенные значения предела прочности в диапазоне 7,7...42%.

Примечательно, что полученный диапазон достаточно близок к величине отклонений между значениями силы резки по результатам экспериментов и моделирования МКЭ, полученным в работе [8].

Таким образом, для вычисления показателя упрочнения в аппроксимации (2), путем подстановки в

него выражения (3) и соблюдения условия (1), было получено уравнение:

$$m_0 = \frac{\ln(\sigma_b/\sigma_{0,2})}{\ln[500 \cdot \ln(1 + \delta)]}. \quad (4)$$

Для построения кривых текучести при расчете интенсивности напряжений использовали известную зависимость, позволяющую учесть скорость деформации [10]:

$$\sigma_i = \sigma_{ст}(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_{ст})^m, \quad (5)$$

где  $\dot{\epsilon}$  – текущая скорость деформации;

$\dot{\epsilon}_{ст}$  – скорость деформации, при статических испытаниях (принимали  $\dot{\epsilon}_{ст} = 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ );

$m$  – показатель скоростного упрочнения, который для конструкционных сталей при температуре деформации 20°C равен  $m = 0,019$  [10].

Аналогично, с учетом выражения (3) и условия (1), была преобразована аппроксимация диаграмм пластичности А. А. Лабутина и Г. А. Смирнова-Аляева, которые представляют собой зависимость пластической деформации разрушения  $\bar{\epsilon}_f$  (предельной пластической деформации) от показателя напряженного состояния  $\eta$ :

$$\bar{\epsilon}_f = 2 \cdot \ln(1 + \delta)e^{-0,72 \cdot \eta}. \quad (6)$$

Показатель напряженного состояния, предложенный Г. А. Смирновым-Аляевым [11] определяется отношением:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3|I_2(D_\sigma)|}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}, \quad (7)$$

где  $I_1(T_\sigma)$  – первый инвариант тензора напряжений;

$I_2(D_\sigma)$  – второй инвариант девиатора напряжений;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения;

$\sigma_u$  – интенсивность напряжений.

Алгоритм (1)–(7) использовали при описании пластических и прочностных свойств материала при трехмерном конечно-элементном моделировании процесса резки на ножницах с параллельными ножами. Для этого использовали конечно-элементный программный комплекс ABAQUS.

Количество разработанных моделей соответствовало числу вариантов экспериментальных резов. Каждая обязательно состоит из двух абсолютно жестких недеформируемых элементов – верхний и нижний ножи, а отдельные модели имеют третий – прижим (если его использовали при проведении эксперимента). Также обязательно имеет место еще один элемент – деформируемый брус – разделяемый профиль квадратного или прямоугольного сечения. Кроме того, по аналогии с работой [14], для учета

упругой деформации станины в модель введен упругий элемент, а для исключения значительных динамических колебаний – вязкий демпфер.

Прижим, верхний и нижний ножи описываются как дискретные недеформируемые поверхности, состоящие из жестких трехмерных четырехузловых билинейных четырехугольных элементов (R3D4).

Сетка деформируемого бруса состоит из изопараметрических шестигранных восьмиузловых линейных элементов с редуцированной схемой интегрирования (C3D8R), имеющих свойства сплошной деформируемой среды. При этом сетка имеет сгущение в очаге резки.

Общий вид модели, а также исходная структура сетки представлены на рис. 1.

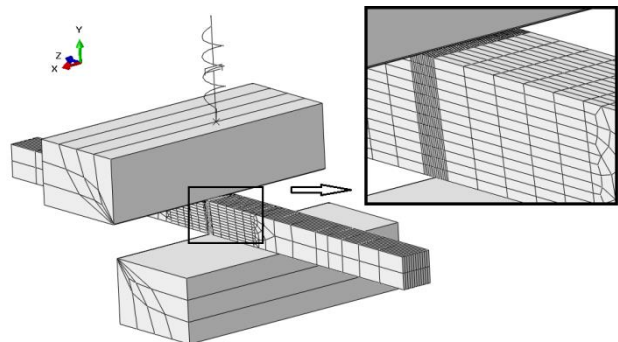


Рис. 1 – Общий вид модели и исходная структура сетки

Учитывая, что процесс разделения металла сопровождается большими пластическими деформациями, в ходе математического моделирования использовалась процедура адаптации сетки в формулировке Лагранжа-Эйлера [4].

Трение между контактными поверхностями моделирует закон трения Кулона. Разрушение материала моделировали методом исключения элементов из расчета, после исчерпания ресурса пластичности в соответствии с диаграммой пластичности.

Для подтверждения адекватности и достоверности разработанных математических моделей использовали известные результаты исследований А. И. Целикова [1,8], а также результаты собственных лабораторных исследований, которые проводились в разное время на лабораторных ножницах поперечной резки трех различных конструкций. Такой подход позволил учесть влияние на процессы разделения металла конструктивных особенностей ножниц и скоростных параметров реализации процесса.

В частности, использовали кривошипно-шатунные с параллельным расположением суппортов лабораторные ножницы (рис. 2) кафедры «Машины металлургического комплекса» Донбасского государственного технического университета (г. Алчевск, Украина). Ножницы рассчитаны на максимальную силу резки 200 кН. Максимальный ход нижнего ножа составляет 35 мм. В ходе работы ножниц нижнему суппорту сообщается возвратно

поступательное движение, а верхний суппорт остается неподвижным.

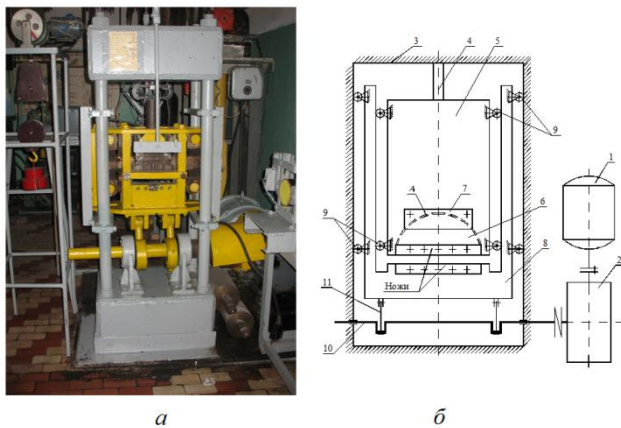


Рис. 2 – Общий вид кривошипно-шатунных лабораторных ножниц: а- с параллельным расположением суппортов; б - их конструктивная схема лабораторных ножниц

Для контроля основных силовых и кинематических параметров, была использована измерительная система, из тензорезисторных преобразователей, одного десятиканального усилителя «Топаз – 3», который включен в цепь регулируемого блока питания и IBM совместимого компьютера с установленной на его шине платой L-154A, двенадцатиразрядного многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы L-CARD.

На данной установке были получены экспериментальные данные для трех марок стали, характеристики которых и размер перерезаемых сечений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика материала заготовок и условия реализации процесса поперечной резки на кривошипно-шатунных лабораторных ножницах с параллельным расположением суппортов

№ п/п	Материал	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$	Сечение, $h \times b$ , мм
1	Сплав алюминиевый АА6066-Т6	360	395	0,18	10×10
2	Сталь 28Х3СНМВФА (СП28; ЭП326А) после прокатки	860	1000	0,09	8,2×40
3	Сталь 28Х3СНМВФА (СП28; ЭП326А) термоупрочненная	1170	1500	0,08	8,2×30,8

В ходе экспериментальных исследований процессов поперечного разделения листового металлопроката при низких скоростях резки использовали лабораторную установку пресс-ножниц (рис. 3) в условиях кафедры «Механики и пластического формования» Донбасской государственной машиностроительной академии (г. Краматорск, Украина). Для реализации непосредственно процесса резки, пресс-ножницы устанавливали на гидравлический пресс с максимальным усилием 500 т и скоростью движения нижней плиты 0,6 мм/с, установленный в лаборатории той же кафедры.

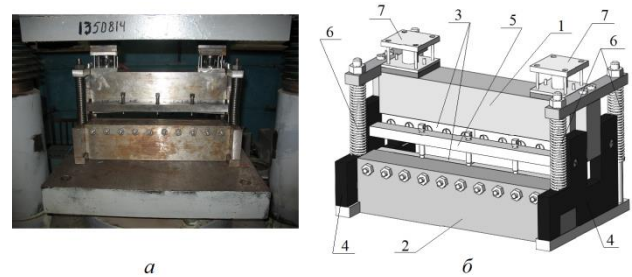


Рис. 3 – Лабораторные пресс-ножницы: а - общий вид; б - конструктивная схема

В ходе реализации процесса резки, по мере подъема нижней плиты пресса, верхний суппорт приводился в движение после установления контакта между верхней плитой и месдозами (поз. 7), закрепленными на верхнем суппорте (поз. 1). При этом контролировали силу резки и сближение верхнего и нижнего суппортов.

В данную измерительную систему включены две месдозы сжатия с пределом измерения  $\leq 20$  т. Сигнал с мостовых схем поступал на тензометрический усилитель Топаз-3, с последующей обработкой аналогово-цифровым преобразователем Е-154 фирмы L-card и вводом в ЭВМ использованием штатного программного обеспечения. Контроль сближения верхнего и нижнего суппортов при резке осуществляли посредством установки соответствующего датчика, построенного на базе переменного резистора ползункового типа с максимальным сопротивлением 23 кОм.

На установке пресс-ножниц были получены экспериментальные данные для четырех марок стали, характеристики которых и размер перерезаемых сечений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика материала заготовок и условия реализации процесса поперечной резки на пресс-ножницах

№ п/п	Материал	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$	Сечение, $h \times b$ , мм
1	ВСт2кп	310	397	0,22	4,9×46,5
2	Сталь 20пс	351	413	0,14	4×46
3	Сталь 20пс	277	399	0,11	3×45
4	Сплав алюминиевый Д16Т (АА2024-Т3)	346	454	0,15	2×41

Экспериментальные исследования по определению сопротивления резу параллельными ножами при относительно высоких скоростях осуществляли на лабораторной установке (рис. 4) кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» Донбасской государственной машиностроительной академии (г. Краматорск, Украина). Величина максимальной резки на ножницах составляла 10 кН.

Рабочие и компенсационные тензометрические датчики сопротивления, предназначенные для измерения силы резки, действующей на верхний нож (поз. 10) и верхний суппорт (поз. 9), были наклеены непосредственно на тело шатуна (поз. 8) и подключены по мостовой схеме, откуда сигнал

поступал на тензометрический усилитель Топаз-3, с последующей обработкой аналогово-цифровым преобразователем Е-154 фирмы L-card и вводом в ЭВМ с использованием штатного программного обеспечения.

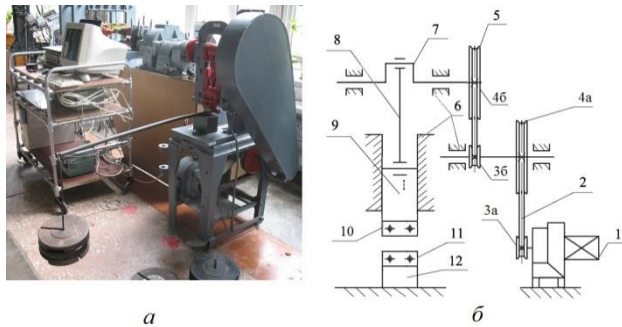


Рис. 4. Общий вид лабораторных ножниц с параллельным резом (а) и их конструктивная схема (б)

На установке лабораторных ножниц с параллельным резом были получены экспериментальные данные для пяти марок стали, характеристики которых и размер перерезаемых сечений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристика материала заготовок и условия реализации процесса поперечной резки на лабораторных ножницах с параллельным резом

№ п/п	Материал	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$	Сечение, $h \times b$ , мм
1	ВСт2кп	310	397	0,22	4,9×6,5
2	Сталь 20пс	351	413	0,14	4×8,6
3	Сталь 20пс	277	399	0,11	3×17
4	Сплав алюминиевый Д16Т (АА2024-Т3)	346	454	0,15	2×22
5	ВСт2кп	202	385	0,34	1×26

**Результаты моделирования.** На рисунке 5 представлены типовые экспериментальные зависимости силы резки в функции времени, полученные на каждой из трех используемых установках, а также соответствующие им расчетные зависимости силы резки, полученные по результатам моделирования МКЭ в соответствии с условиями реализации.

Обработка результатов моделирования показала, что предложенный метод построения кривых текучести и пластичности при трехмерном моделировании процессов холодной резки на ножницах позволяет получать удовлетворительные результаты энергосиловых и кинематических параметров процесса. Коэффициент корреляции между смоделированными и экспериментальными зависимостями превысил 0,8. В экстремуме отклонения максимальных значений силы резки по результатам моделирования МКЭ от экспериментальных значений не превысили  $\pm 15\%$ , а величина относительного внедрения до скола находилась в пределах  $\pm 5\%$ .

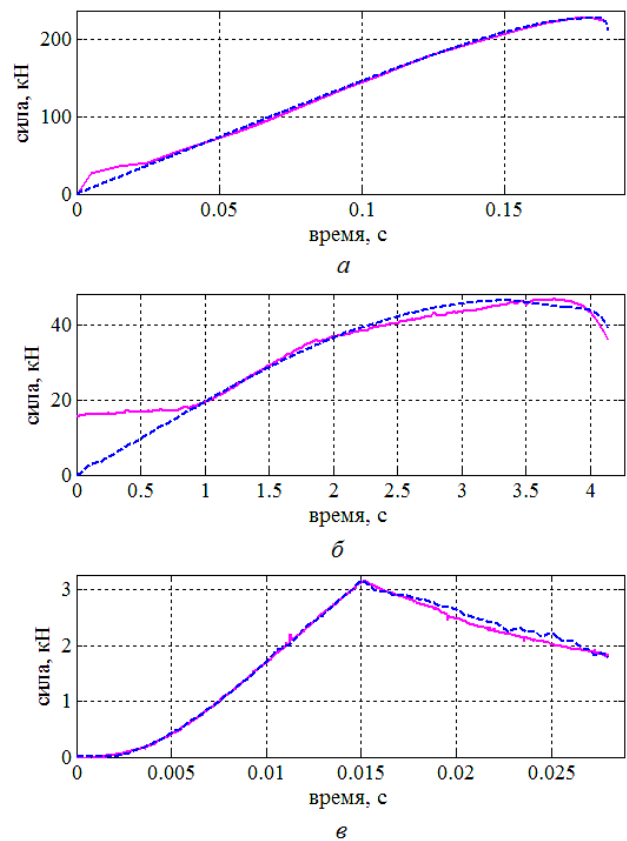


Рис. 5 – Типовые экспериментальные (сплошная линия) зависимости силы резки в функции времени, полученные на каждой из трех используемых установках, и соответствующие им расчетные (пунктирная линия) зависимости силы резки, полученные по результатам моделирования МКЭ в соответствии с условиями реализации эксперимента:

а – табл. 1, №3; б – табл. 2, №3; в – табл. 3, №4

**Выводы.** По результатам работы можно отметить следующее:

- адекватное отображение реального процесса резки в ходе моделирования методом конечных элементов возможно только при наличии достоверных кривых текучести и пластичности в исследуемых диапазонах температур, степени и скорости деформации;

- на базе известных методов построения кривых текучести и пластичности разработан простой и эффективный метод их построения по результатам испытаний на растяжение в зависимости от предела текучести и предела прочности материала, а также относительного удлинения при разрыве;

- применение предложенного метода построения кривых текучести и пластичности при трехмерном конечно-элементном моделировании процессов холодной резки на ножницах позволяет получать удовлетворительные результаты энергосиловых и кинематических параметров процесса с коэффициентом корреляции более 0,8;

- предложенный метод будет способствовать развитию математического моделирования процессов



резки на ножницах и углублению представлений о процессах, протекающих в металле.

Результаты работы могут быть полезны при исследовании процессов холодной резки на ножницах в прокатном производстве, а также при разработке практических рекомендаций по их эксплуатации и при принятии конструкторских и технологических решений.

#### Список литературы

1. Лукашин Н. Д., Кохан Л. С., Якушев А. М. Конструкция и расчет машин и агрегатов металлургических заводов: учебник для вузов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 456 с.
2. Siddhartha Ray. Principles and Applications of Metal Rolling. Cambridge University Press, 2016. 320 p.
3. Amar Khennane. Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus. CRC Press, 2013. 487 p.
4. Боровик П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: Навч. посіб. Алчевськ. ДонДТУ, 2012. 170 с.
5. Gustafsson E., Marth S., Karlsson L. et al. Strain and stress conditions at crack initiation during shearing of medium- and high-strength steel sheet. International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2017.
6. Reimer P., Zehetner Ch., Hammelmüller F. et al. Numerical modelling and simulation of sheet metal cutting processes. VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. 2016.
7. Bohdal L. Application of FEM and vision-based methods to analysis of shearing processes in the aspect of scrap reduction. Annual Set the Environment Protection, Vol. 17. 2015. P. 90-103.
8. Боровик П.В. Анализ процесса разделения металла в холодном состоянии на ножницах с параллельными ножами. Зб. наук. пр. ДонДТУ. Алчевськ. 2014. № 2 (43). С. 36-41.
9. Гохфельд Д. А., Гецов Л. Б., Кононов К. М. и др. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении. Справочник. Екатеринбург: УрО РАН. 1996. 408 с.
10. Ушаков М.В., Ильяхин С.Ю., Воробев И.А. Учет влияния скорости деформации и температуры на процессы, происходящие в зоне первичной деформации при резании металлов. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4. Ч. 2. Тула: ТулГУ. 2010. С. 89-93.
11. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. К. : Вища шк. 1983. 175 с.
12. Марочник сталей и сплавов. А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. А.С. Зубченко. М. : Машиностроение. 2003. 784 с.
13. Шишков М.М. Марочник сталей і сплавів: довідник. Вид. 3-є, доповнене. Донецьк: Юго-Восток. 2002. 456 с.
14. Боровик П. В. Математическое моделирование процесса резки на ножницах с учетом упругой деформации станины. Сборник научных трудов. Вестник национального технического университета ХПИ. Харьков, 2011. Вып. 47. С. 76-80.

#### References (transliterated)

1. Lukashin N. D., Kohan L. S., Jakushev A. M. Konstrukcija i raschet mashin i agregatov metallurgicheskikh zavodov: uchebnik dlja vuzov. M.: IKC «Akademkniga», 2003. 456 s.
2. Siddhartha Ray. Principles and Applications of Metal Rolling. Cambridge University Press, 2016. 320 p.
3. Amar Khennane. Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus. CRC Press, 2013. 487 p.
4. Borovik P. V. Teoretychni doslidzhennya procesiv obrobky metaliv tiskom na osnovi metodu skincheny'x elementiv: Navch. posib. Alchev's'k. DonDTU, 2012. 170 s.
5. Gustafsson E., Marth S., Karlsson L. et al. Strain and stress conditions at crack initiation during shearing of medium- and high-strength steel sheet. International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2017.
6. Reimer P., Zehetner Ch., Hammelmüller F. et al. Numerical modelling and simulation of sheet metal cutting processes. VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. 2016.
7. Bohdal L. Application of FEM and vision-based methods to analysis of shearing processes in the aspect of scrap reduction. Annual Set the Environment Protection, Vol. 17. 2015. P. 90-103.
8. Borovik P.V. Analiz processa rozdelenija metalla v holodnom sostojanii na nozhnicah s parallel'nymi nozhami. Zb. nauk. pr. DonDTU. Alchev's'k. 2014. № 2 (43). S. 36-41.
9. Gohfel'd D. A., Gecov L. B., Kononov K. M. i dr. Mehanicheskie svojstva stalej i splavov pri nestacionarnom nagruzenii. Spravochnik. Ekaterinburg: UrO RAN. 1996. 408 s.
10. Ushakov M.V., Il'juhin S.Ju., Vorobev I.A. Uchet vlijaniya skorosti deformacii i temperatury na processy, proishodjashhie v zone pervichnoj deformacii pri rezanii metallov. Izvestija TulGU. Tehniceskie nauki. Vyp. 4. Ch. 2. Tula: TulGU. 2010. S. 89-93.
11. Ogorodnikov V. A. Ocenka deformiruемости metallov pri obrabotke davleniem. K. : Vishha shk. 1983. 175 s.
12. Marochnik stalej i splavov. A.S. Zubchenko, M.M. Koloskov, Ju.V. Kashirskij i dr. Pod obshhej red. A.S. Zubchenko. M. : Mashinostroenie. 2003. 784 s.
13. Shy' shkov M.M. Marochny'k stalej i splaviv: dovidny'k. Vy'd. 3-ye, dopovnene. Donec'k: Yugo-Vostok. 2002. 456 s.
14. Borovik P. V. Matematicheskoe modelirovanie processa rezki na nozhnicah s uchetoм uprugoy deformacii staniny. Sbornik nauchnyh trudov. Vestnik nacional'nogo tehniceskogo universiteta HPI. Har'kov, 2011. Vyp. 47. S. 76-80.

Поступила (received) 30.10.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Боровік Павло Володимирович (Боровик Павел Владимирович, Borovik Pavlo Volodymyrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, доцент кафедри «Машинознавство та обладнання промислових підприємств»; м. Сєвєродонецьк, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5353-2022>; e-mail: borovikpv@ukr.net